

IMPLEMENTACIÓN DE UN ELEMENTO NO LINEAL PARA LA MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN DISIPADOR DE ENERGÍA POR FLUENCIA DE ACERO

Juan Pablo Ascheri, Oscar Möller, Marcelo Rubinstein

Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, (2000) Ciudad de Rosario, Argentina. jascheri@fceia.unr.edu.ar

Palabras Claves: control de estructuras, dinámica estructural, control pasivo.

Resumen. El control pasivo de la respuesta de estructuras sismorresistentes, con el objetivo de disminuir sensiblemente el nivel de daños sin recurrir a fuentes de energía externa, ha tenido un desarrollo importante en las dos últimas décadas.

La utilización de dispositivos de disipación de energía, denominados de control pasivo, tienen el objetivo de disminuir y hasta evitar el daño en los elementos estructurales, concentrándolo en dispositivos reemplazables.

El diseño y la verificación de estructuras que utilizan dichos dispositivos requiere de herramientas computacionales adecuadas que representen el comportamiento de las estructuras sometidas a acciones sísmicas, permitiendo el análisis no lineal y la incursión en el campo plástico.

En este trabajo se presenta un elemento que se suma a un software de análisis estático y dinámico no lineal que aplica el método de los elementos finitos con formulación en desplazamientos. Dicho elemento incorpora tres resortes no lineales, uno en cada grado de libertad.

Este elemento permite resolver el comportamiento no lineal que caracteriza a los distintos disipadores de energía en estructuras planas, y a través del análisis con la simplificación de retener solo tres grados de libertad por piso, dos traslaciones horizontales y una rotación alrededor del eje vertical, resolver los sistemas espaciales de edificios sismorresistentes.

En cada iteración de equilibrio de cada paso de tiempo o escalón de carga, los incrementos de desplazamientos obtenidos en el sistema global de tres grados de libertad por piso, se transforman a incrementos de desplazamientos impuestos horizontales en cada plano, utilizándose ahí los modelos no lineales desarrollados para estructuras planas.

Como aplicación se muestra la verificación no lineal de una estructura espacial que fue desarrollada a través de la aplicación de una metodología de diseño preliminar.

1 INTRODUCCIÓN

En la ingeniería sismorresistente una importante tendencia actual consiste en implementar sistemas de control de la respuesta. Entre ellos los más utilizados son los denominados sistemas de control pasivo (Soong et al. 1997; Bozzo et al. 2000; Ascheri et al. 2006,2007).

Estos sistemas son implementados bajo el criterio comúnmente aceptado que, bajo un sismo severo (sismo de ocurrencia rara), el sistema estructural permanezca en rango elástico (Bozzo et al. 2000; Kasai et al. 2004), concentrándose la no linealidad y la consecuente disipación de energía en los dispositivos disipadores de energía.

Este tipo de sistema de control de estructuras, se ha desarrollado a tal punto que hoy en día se encuentran en el mercado una amplia gama de dispositivos con distintas características en cuanto a diseño, funcionamiento, tecnología de aplicación y performance, que hacen difícil elegir el dispositivo más eficaz y conveniente en cada caso en particular.

Los dispositivos más utilizados, se pueden clasificar en disipadores por fluencia de acero, de fricción, viscosos, de aceite y viscoelásticos.

Es necesario para la correcta verificación de las estructuras diseñadas con este tipo de sistemas, desarrollar elementos numéricos compatibles con los softwares de análisis no lineal utilizados.

En este trabajo se desarrolla el modelo numérico correspondiente a un dispositivo de disipación de energía por fluencia de acero para ser incorporado a un software de análisis estático y dinámico no lineal que aplica el método de los elementos finitos con formulación en desplazamientos, el cual lleva varios años de desarrollo en el Laboratorio de Estructuras.

Estos dispositivos de disipación de energía suelen estar implementados con unos brazos que lo conectan con la estructura a controlar. Esta forma de aplicación y la estructura del software hacen que sea favorable incorporar este dispositivo como un elemento de barra de dos nodos y tres grados de libertad por nodo que es perfectamente compatible con los restantes elementos de barra lineales y no lineales ya desarrollados.

La verificación del sistema espacial (Möller et al. 2003) se hace a través de la simplificación de retener solo tres grados de libertad por piso, dos traslaciones horizontales y una rotación alrededor del eje vertical, aprovechando los modelos de elementos no lineales para estructuras planas desarrollados e implementados.

2 DISIPADORES POR FLUENCIA DE ACERO

El comportamiento de un disipador que trabaja por fluencia de acero presenta una curva de comportamiento fuerza desplazamiento que se representa en la figura 1.

Los valores de la carga de fluencia, rigidez y reendurecimiento dependen de las características mecánicas del acero utilizado y de las características geométricas del elemento, las cuales son utilizadas para el dimensionamiento del mismo.

Dispositivos de estas características mostrados en la figura 2, brindan una idea de los distintos tipos de diseños, en este caso en X y triangular.

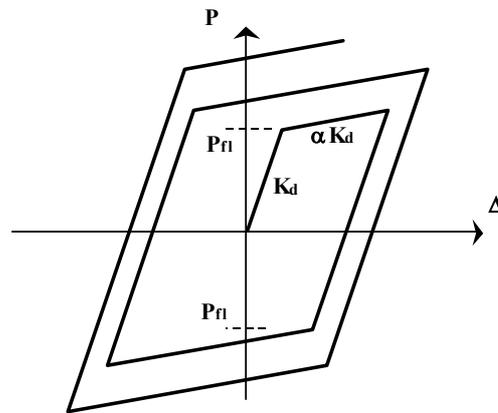


Figura 1: Modelo del comportamiento de un dispositivo de control pasivo por fluencia de aceros.

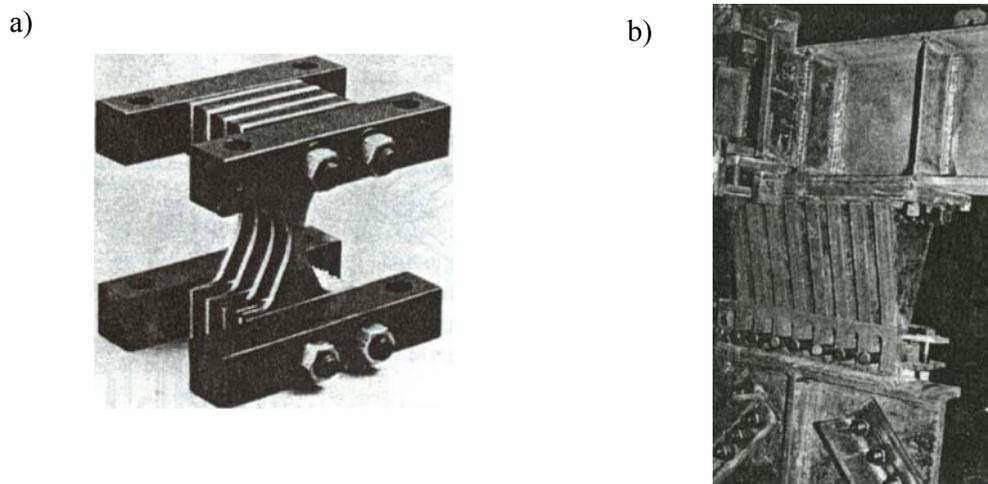


Figura 2: Amortiguadores metálicos; a) Amortiguador con chapas en forma de X(Counter Quake Corp.), b) Amortiguador de chapas triangulares (Tsai et al., 1993).

Las características mecánicas del disipador se pueden determinar a través de las características del acero utilizado, las características geométricas de las chapas y del número de chapas empleado. En el caso de los disipadores de tipo triangular, los parámetros necesarios para el modelo del comportamiento se obtienen de las siguientes fórmulas.

$$P_{fl} = \frac{NEw_0h^2}{6L} \varepsilon_{fl} \tag{1}$$

$$K_d = \frac{NEw_0h^3}{6L^3} \tag{2}$$

$$\Delta_{fl} = \frac{\varepsilon_{fl}L^2}{h} \tag{3}$$

Donde E es el módulo de elasticidad del acero empleado, h , L y w_0 son las características geométricas de las chapas graficadas en la figura 3 y N el número de chapas que forman parte del dispositivo.

P_{fl} y K_d son respectivamente la carga de fluencia y la rigidez que modeliza el comportamiento del dispositivo que se ilustra en la figura 1. Δ_{fl} es el desplazamiento de fluencia de dicho dispositivo.

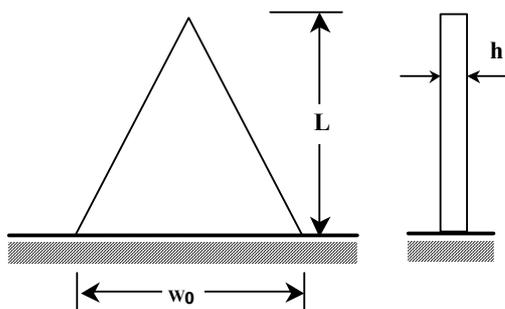


Figura 3: Modelo matemático de una chapa genérica del dispositivo disipador de energía por fluencia de aceros de chapas triangulares

3 CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO

Se desarrolló un elemento denominado elemento tipo 9 compuesto de tres subelementos conectados en serie como se distingue en la figura 4.

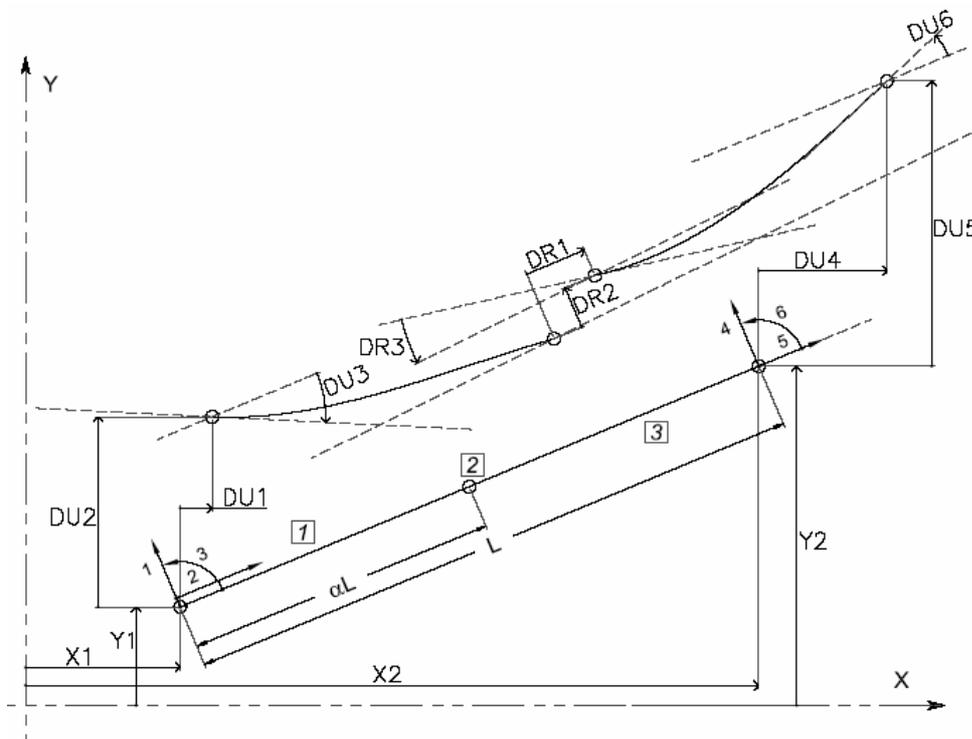


Figura 4: Esquema general del elemento tipo 9

Los subelementos 1 y 3 corresponden a dos elementos de barras de dos nodos y tres grados de libertad por nodo, elásticos y lineales, que intentan modelizar el comportamiento de los brazos de ensamble, mientras que el subelemento 2 está compuesto por tres resortes, uno para cada grado de libertad, a los cuales se le pueden otorgar por separado diferentes ecuaciones constitutivas. Los desplazamientos nodales (DU) en cada grado de libertad generan desplazamientos relativos (DR) en los tres resortes del subelemento 2.

3.1 Subelementos de barra 1 y 3

Se resuelve los brazos de ensamble eligiendo una función lineal para interpolar los desplazamientos longitudinales y un polinomio cúbico para los transversales, llegando a la clásica matriz de rigidez lineal de la ecuación (4).

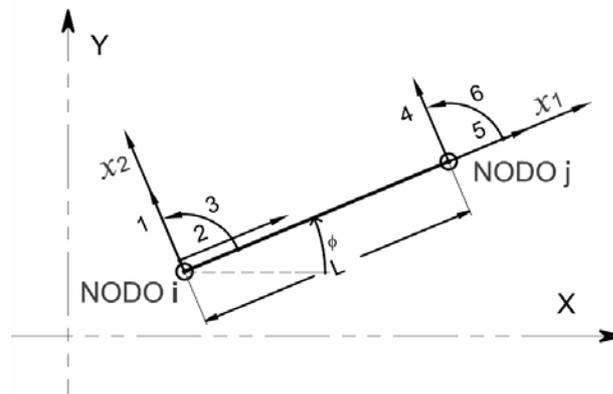


Figura 5: Esquema de los subelementos 1 y 2

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Los valores clásicos de inercia, sección y modulo de elasticidad del material que componen dichos brazos son necesarios. La longitud L se obtiene de la figura 4 como αL en el caso del subelemento 1 y $(1-\alpha)L$ para el caso del subelemento 2, siendo L la longitud del elemento tipo 9 y α el parámetro que permite variar la ubicación del subelemento 2 dentro del elemento tipo 9.

3.2 Subelemento 2 de resortes no lineales

Este elemento está compuesto por tres resortes, uno para cada grado de libertad, a los cuales se le pueden otorgar por separado diferentes ecuaciones constitutivas. Este elemento vincula las barras 1 y 3 de la figura 4 y es el responsable de la no linealidad. Al mismo se lo simula con una longitud nula, siendo el parámetro α de la figura 4 el que determina la ubicación del mismo en el sistema formado por estos tres subelementos. Una modelización de lo desarrollado se observa en la figura 6.

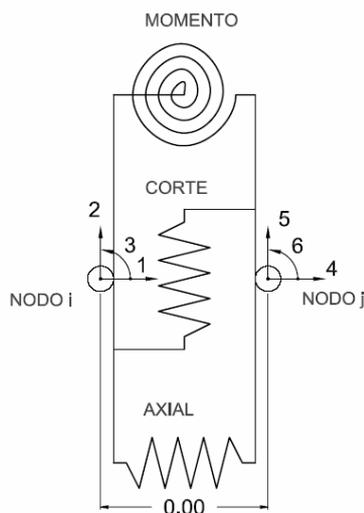


Figura 6: Esquema general subelemento 2

A partir de ello, la relación entre fuerzas y desplazamientos relativos de los nodos de dicho subelemento 2 queda definida por la siguiente relación:

$$\Delta \mathbf{F} = \mathbf{K}_R \Delta \mathbf{u} \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \\ \Delta F_3 \\ \Delta F_4 \\ \Delta F_5 \\ \Delta F_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 \\ & k_2 & 0 & 0 & -k_2 & 0 \\ & & k_3 & 0 & 0 & -k_3 \\ & & & k_1 & 0 & 0 \\ & & & & k_2 & 0 \\ & & & & & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \\ \Delta u_5 \\ \Delta u_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde k_1 , k_2 , k_3 , representan la rigidez de los resortes axial, de corte y momento respectivamente, los cuales pueden tener distintas ecuaciones constitutivas.

3.3 Ensamble del elemento

En la figura 7 se muestra de forma simplificada, un elemento tipo 9 compuesto por ambos brazos de instalación, elementos 1 y 3 y el resorte no lineal del elemento 2 que a modo de ilustración se grafica como si fuera un resorte axial pero corresponde a los tres resortes no lineales, axial, de corte y de giro que se grafican en la figura 6.

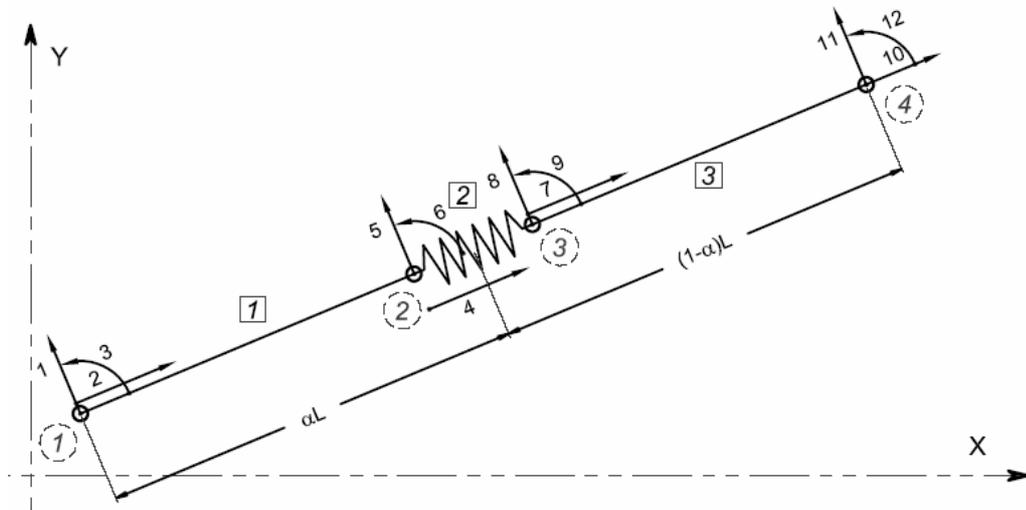


Figura 7: Esquema general del elemento tipo 9 compuesto por los tres subelementos

A partir de las matrices de rigidez de cada subelemento se ensambla la matriz de rigidez del elemento que tiene una dimensión de 12×12 .

La matriz de rigidez se observa en la ecuación (7), los subíndice de los parámetros E y A corresponden al número de subelemento que caracterizan y los subíndice en los coeficientes de rigidez k , corresponde al número de resorte no lineal del subelemento dos caracterizado en la ecuación (6)

A partir de la matriz de rigidez del sistema de los tres subelementos descripto, se obtiene la matriz de rigidez del elemento de la figura 4, el cual es utilizado en el programa. Dicho procedimiento se realiza numéricamente en cada paso de tiempo para poder actualizar los coeficientes de rigidez k_1, k_2, k_3 , de cada uno de los resortes no lineales del subelemento 2, los cuales cumplen con sus respectivas ecuaciones constitutivas P- Δ ., ver figura 1.

La matriz de rigidez del elemento con los grados de libertad condensados, se obtiene otorgándole desplazamientos unitarios a cada grado de libertad de los extremos y consiguiendo las reacciones en cada uno de ellos.

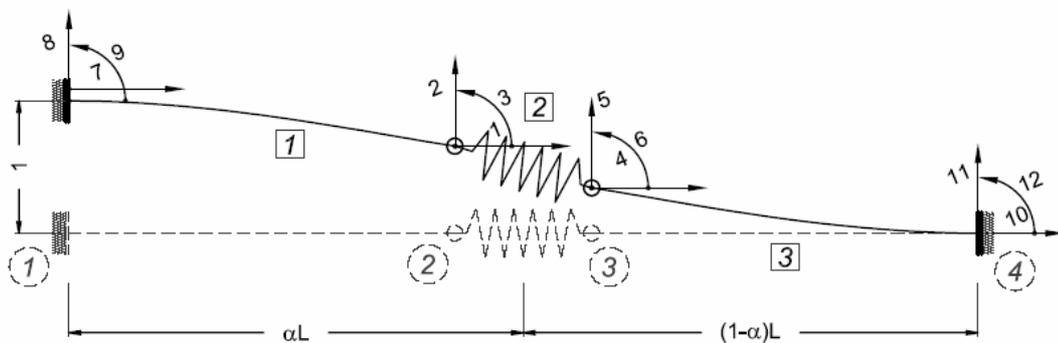


Figura 8: Desplazamiento unitario según el grado de libertad 8 para el cálculo del vector de reacciones de los grados de libertad 7 a 12 que se utiliza en la matriz de rigidez del elemento tipo 9 de la figura 4

$$\begin{array}{cccccccccccc}
\frac{A_1}{L} & 0 & 0 & -\frac{E_1 A_1}{\alpha L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{12E_1 I_1}{(\alpha L)^3} & \frac{6E_1 I_1}{(\alpha L)^2} & \frac{4E_1 I_1}{\alpha L} & 0 & -\frac{12E_1 I_1}{(\alpha L)^3} & \frac{6E_1 I_1}{(\alpha L)^2} & \frac{2E_1 I_1}{\alpha L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{E_1 A_1}{\alpha L} + k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{12E_1 I_1}{(\alpha L)^3} + k_2 & -\frac{6E_1 I_1}{(\alpha L)^2} & \frac{4E_1 I_1}{\alpha L} + k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{E_3 A_3}{\beta L} + k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{E_3 A_3}{\beta L} & 0 & 0 \\
\frac{12E_3 I_3}{(\beta L)^3} + k_2 & \frac{6E_3 I_3}{(\beta L)^2} & \frac{4E_3 I_3}{\beta L} + k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{12E_3 I_3}{(\beta L)^3} & \frac{6E_3 I_3}{(\beta L)^2} \\
\frac{E_3 A_3}{\beta L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{6E_3 I_3}{(\beta L)^2} & \frac{2E_3 I_3}{\beta L} \\
\frac{12E_3 I_3}{(\beta L)^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{6E_3 I_3}{(\beta L)^2} \\
\frac{E_3 A_3}{\beta L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{4E_3 I_3}{\beta L} \\
\frac{12E_3 I_3}{(\beta L)^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{6E_3 I_3}{(\beta L)^2} \\
\frac{E_3 A_3}{\beta L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{4E_3 I_3}{\beta L}
\end{array}$$

(7)

RUBINSTEIN

En la figura 8 se muestra el elemento con los grados de libertad reenumerados ordenándolos en grados de libertad desplazables y grados de libertad restringidos, donde se le confiere un desplazamiento unitario según el grado de libertad 8. El vector de las reacciones pasa a formar parte de la matriz de rigidez del elemento.

Dicha matriz, afectada por la matriz de rotación, transformándolo al sistema de ejes globales, se ensambla en la matriz de la estructura, la cual permite en cada paso la resolución del problema.

3.4 Solución general

Sobre el sistema de ecuaciones de equilibrio se aplica el algoritmo de Newmark de integración paso a paso, y el esquema iterativo de Newton-Raphson para ajustar el equilibrio en cada paso.

Del algoritmo de solución donde ahora el subíndice n indica el paso de tiempo y el supraíndice m la iteración de equilibrio y que por simplicidad en la notación se elimina el \wedge que indicaba acciones en los nodos, se obtiene desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas internas en los distintos grados de libertad que serán utilizados para la resolución de elemento analizado.

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{n-1} + \Delta \mathbf{u}_n \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_n = a_1 \Delta \mathbf{u}_n - \mathbf{P}_{n-1} \quad (9)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_n = a_0 \Delta \mathbf{u}_n - \mathbf{Q}_{n-1} \quad (10)$$

$$\Delta \mathbf{u}_n \rightarrow \Delta \mathbf{F}_n \rightarrow \mathbf{F}_n = \mathbf{F}_{n-1} + \Delta \mathbf{F}_n \quad (11)$$

3.5 Solución interna del elemento

A partir de la matriz de rigidez del elemento formado por los tres subelementos descriptos (7), y reordenando los grados de libertad como se describe en la figura 8, se obtiene el sistema de ecuaciones que permite obtener numéricamente la matriz de rigidez del elemento tipo 9.

Los grados de libertad del 1 al 6 son los grados de libertad desplazables y los grados de libertad del 7 al 12 son los restringidos.

La matriz de rigidez reenumerada queda de la siguiente forma:

$$\mathbf{KE} = \begin{bmatrix} \mathbf{KDD} & \mathbf{KDR} \\ \mathbf{KRD} & \mathbf{KRR} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde la letra **D** hace referencia a los grados de libertad desplazables y la letra **R** a los restringidos.

El sistema de ecuaciones queda formado como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{KDD} & \mathbf{KDR} \\ \mathbf{KRD} & \mathbf{KRR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{D} \\ \Delta \mathbf{R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{PD} \\ \mathbf{PR} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Donde $\Delta \mathbf{D}$ y \mathbf{PD} son los vectores correspondientes respectivamente a los desplazamiento y esfuerzos en los grados de libertad desplazables y $\Delta \mathbf{R}$ y \mathbf{PR} a los restringidos, luego:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{D} &= \mathbf{KDD}^{-1}(\mathbf{PD} - \mathbf{KDR} \Delta \mathbf{R}) \\ \mathbf{PR} &= \mathbf{KRD} \Delta \mathbf{D} + \mathbf{KRR} \Delta \mathbf{R}\end{aligned}\quad (14)$$

Resolviendo el sistema para vectores $\Delta \mathbf{R}$ con valores unitarios en un grado de libertad y cero en los restantes, se obtiene respectivamente los vectores \mathbf{PR} que conforman la matriz de rigidez del elemento tipo 9.

Una vez obtenida la matriz de rigidez del elemento se premultiplica por la transpuesta de la matriz de rotación y se multiplica por la matriz de rotación para pasar de ejes locales a ejes estructurales, luego se ensambla con la matriz de rigidez de la estructura para formar parte de la matriz de rigidez efectiva de la solución del sistema.

De la solución general, se obtiene el cálculo de las fuerzas internas del elemento 9 a partir del $\Delta \mathbf{u}_n^m$ de la ecuación (11)

3.5.1 Cálculo de fuerzas internas

A partir de $\Delta \mathbf{u}_n^m$, se obtiene $\Delta \mathbf{R}_n^m$ a través de la matriz que vincula los grados de libertad de la estructura con los grados de libertad del elemento y de la matriz de rotación para el paso de ejes globales a ejes locales.

1. Iteraciones de equilibrio l -ésima: $l \leftarrow l + 1$

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{D}_n^{m,l} &= \mathbf{KDD}_n^{m,l-1}(\mathbf{PD}_n^{m,l} - \mathbf{KDR}_n^{m,l} \Delta \mathbf{R}_n^m) \\ \mathbf{PR}_n^{m,l} &= \mathbf{KRD}_n^{m,l} \Delta \mathbf{D}_n^{m,l} + \mathbf{KRR}_n^{m,l} \Delta \mathbf{R}_n^m\end{aligned}\quad (15)$$

El vector $\Delta \mathbf{D}_n^{m,1}$ es el vector de desplazamiento $\Delta \mathbf{u}_n^{m,1}$ del subelemento 2 de la ecuación (5), a través del cual se puede obtener el desplazamiento relativo de los tres resortes como:

$$\Delta \mathbf{DR}_n^{m,l} = \begin{bmatrix} \Delta u_4^l - \Delta u_1^l \\ \Delta u_5^l - \Delta u_2^l \\ \Delta u_6^l - \Delta u_3^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta dr_1^l \\ \Delta dr_2^l \\ \Delta dr_3^l \end{bmatrix}\quad (16)$$

$$\mathbf{DR}_n^{m,l} = \mathbf{DR}_{n-1} + \Delta \mathbf{DR}_n^{m,l}\quad (17)$$

$\mathbf{DR}_n^{m,1}$ corresponde a los desplazamientos relativos de cada resorte en el paso n , de la iteración m y de la subiteración l .

$\mathbf{PD}_n^{m,1}$ es un vector nulo (para $l = 0$).

Siguiendo el mismo esquema iterativo de Newton-Raphson para ajustar el equilibrio en cada paso, con \mathbf{DR}_{n-1} y $\Delta \mathbf{DR}_n^{m,1}$, se ingresa en la ecuación constitutiva de cada resorte no lineal, que para el caso de los disipadores de fluencia de aceros sigue la ley de la figura 1, se actualiza la rigidez (k_1, k_2, k_3 de la ecuación 6) y se obtiene las fuerzas dfr_0^l correspondiente al resorte i en el paso n a partir del inicio del paso correspondiente para dicho resorte i a la fuerza $f_{i^{n-1}}$ y al desplazamiento relativo $dr_{i^{n-1}}$. Dichas fuerzas conforman el vector $\mathbf{DFR}_n^{m,1}$ de la ecuación (19).

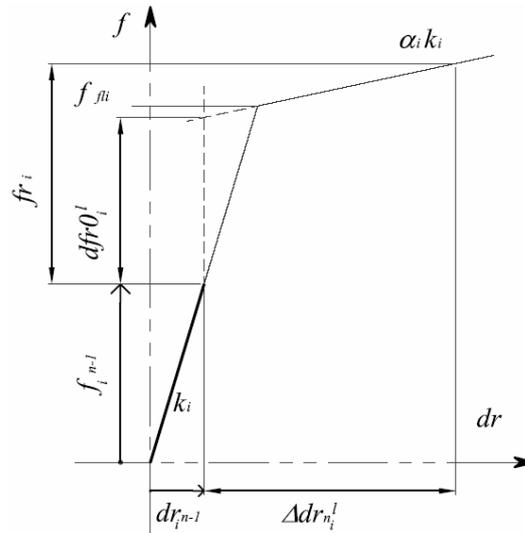


Figura 9: Esquema de un paso l en la ecuación constitutiva del resorte no lineal i .

$$\mathbf{FR}_n^{m^l} = \begin{bmatrix} fr_1^l \\ fr_2^l \\ fr_3^l \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$\mathbf{DFR0}_n^{m^l} = \begin{bmatrix} dfr0_1^l \\ dfr0_2^l \\ dfr0_3^l \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$\mathbf{PD}_n^{m^{l+1}} = \begin{bmatrix} dfr0_1^l \\ dfr0_2^l \\ dfr0_3^l \\ -dfr0_1^l \\ -dfr0_2^l \\ -dfr0_3^l \end{bmatrix} \tag{20}$$

2. Verificar convergencia

$$\frac{\|\mathbf{FR}_n^{m^l} - \mathbf{FR}_n^{m^{l-1}}\|_2}{\|\mathbf{FR}_n^{m^{l-1}}\|_2} \leq RTOL = 10^{-2}, \quad \frac{\|\mathbf{DR}_n^{m^l} - \mathbf{DR}_n^{m^{l-1}}\|_2}{\|\mathbf{DR}_n^{m^{l-1}}\|_2} \leq ETOL = 10^{-3} \tag{21}$$

- Si no converge pasar al paso 1
- Si converge pasar al paso 3

3. Actualizar vectores

- Si se encuentra dentro de la iteración de la solución general:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{D}_n^{m^{l+1}} &= \mathbf{KDD}_n^{m^{l+1}-1} \left(\mathbf{PD}_n^{m^{l+1}} - \mathbf{KDR}_n^{m^{l+1}} \Delta \mathbf{R}_n^m \right) \\ \mathbf{PR}_n^{m^{l+1}} &= \mathbf{KRD}_n^{m^{l+1}} \Delta \mathbf{D}_n^{m^{l+1}} + \mathbf{KRR}_n^{m^{l+1}} \Delta \mathbf{R}_n^m\end{aligned}\quad (22)$$

Luego $\mathbf{PR}_n^{m^{l+1}}$ que corresponde a las reacciones del elemento 9 al aplicarse desplazamientos nodales de $\Delta \mathbf{R}_n^m$, teniendo en cuenta el vector $\mathbf{PD}_n^{m^{l+1}}$, se transforma por la matriz de rotación correspondiente y se acopla al vector $\Delta \mathbf{F}_n^m$ de la ecuación (11)

- Si se encuentra actualizando vectores dentro de la solución general:

$$\mathbf{PR}_n = \begin{bmatrix} -fr_1 \\ -fr_2 \\ -(fr_3 + fr_2 \times \alpha \times L) \\ fr_1 \\ fr_2 \\ (fr_3 - fr_2 \times (1 - \alpha) \times L) \end{bmatrix}\quad (23)$$

Luego \mathbf{PR}_n que corresponde al incremento de esfuerzos en los nodos del elemento 9 en el paso n , se transforma por la matriz de rotación correspondiente y se acopla al vector $\Delta \mathbf{F}_n$ del fin de la iteración en la solución general

3.6 Implementación en sistemas espaciales

Se analiza las estructuras de edificios sismorresistentes con la simplificación de retener solo tres grados de libertad por piso, dos traslaciones horizontales y una rotación alrededor del eje vertical. Se aprovechan los modelos de elementos no lineales para estructuras planas desarrollados, implementados y verificados en trabajos anteriores, (Möller et al., 2003).

La estrategia numérica consiste en que los “elementos finitos” del sistema estructural son los planos resistentes. En cada iteración de equilibrio de cada paso de tiempo o escalón de carga, los incrementos de desplazamientos obtenidos en el sistema global de tres grados de libertad por piso, se transforman a incrementos de desplazamientos impuestos horizontales en cada plano, utilizándose ahí los modelos no lineales desarrollados para estructuras planas.

4 APLICACION

Se realiza la verificación de un diseño preliminar sobre una construcción de cinco pisos y planta rectangular de 15 m x 9 m, supuestamente ubicada en la ciudad de Mendoza (Rubinstein et al., 2009). En la Figura 10 se muestra la disposición, en planta, de los planos sismorresistentes y en la figura 11, se ilustra dichos planos en elevación donde se utilizó control pasivo mediante disipadores de energía por fluencia de metal.

En la dirección X se han dispuesto cuatro tabiques acoplados y en la dirección Y dos pórticos y dos tabiques adosados.

En la tabla 1 se describe las características de los dispositivos dimensionados siguiendo la metodología de diseño preliminar.

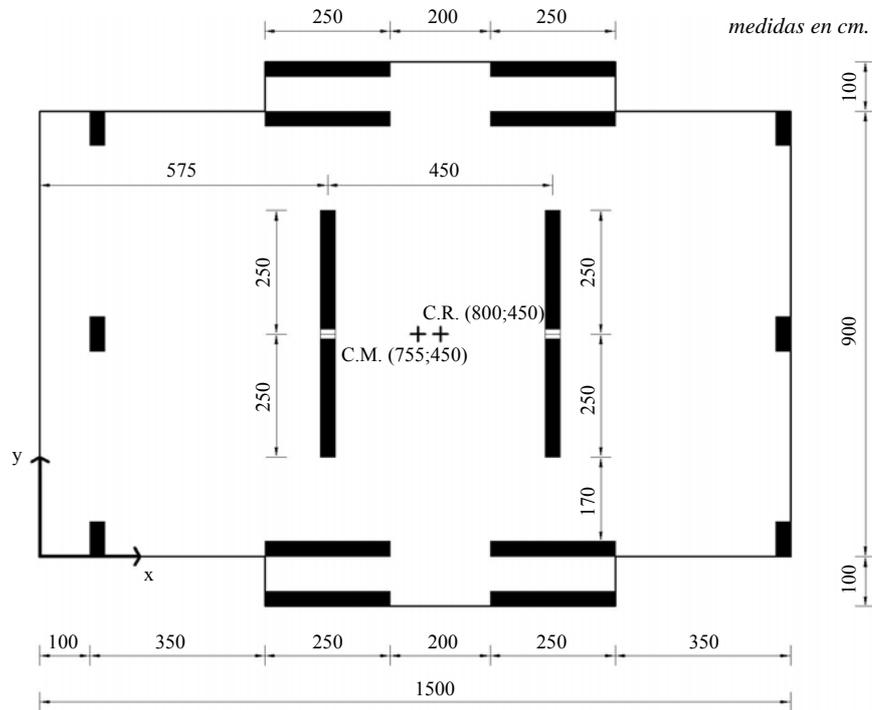
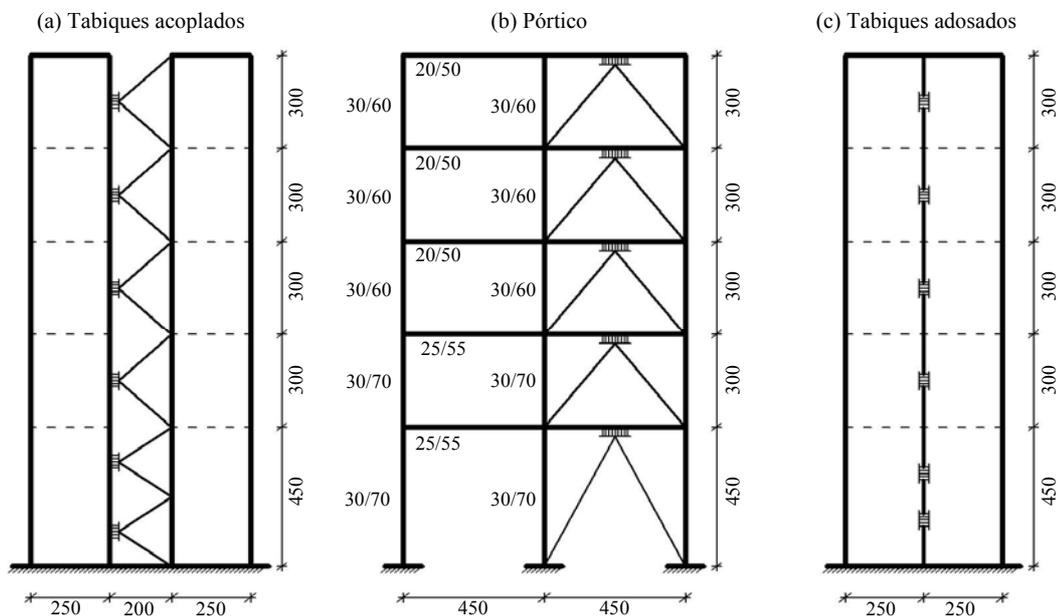


Figura 10: Disposición en planta de los planos sismorresistentes



Medidas en cm
 Espesor de los tabiques 30cm
 Medidas indicadas de las secciones rectas de las barras del pórtico: espesor/altura

Figura 11: Planos sismorresistentes en elevación

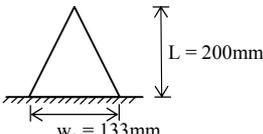
DISIPADOR TIPO:  Espesor de cada chapa: $h = 36,1\text{mm}$ N: número de chapas Brazos de instalación: 2 PNU Material: Acero F-24	PISO	PÓRTICO		TABIQUES ACOPLADOS		TABIQUES ADOSADOS
		N	PNU	N	PNU	N
	1	10	20	2 x 6	2 x 12	2 x 9
	2	9	16	7	12	10
	3	8	14	6	10	9
	4	6	12	4	10	7
	5	3	12	3	10	4

Tabla 1: Características de los dispositivos dimensionados con metodología basada en diseño preliminar

4.1 Análisis Estático

En las Figuras 12 y 13 se muestra el resultado del análisis estático push – over en ambas direcciones. Se observa como en el caso de la dirección X, donde participan los 4 sistemas de tabiques acoplados, la verificación se aproxima con mucha mayor exactitud mostrando dos quiebres bien definidos, el primero antes de los 2.000 KN cuando entran en fluencia los dispositivos disipadores de fluencia y el segundo antes de los 5.000 KN al entrar en fluencia los tabiques.

En caso del análisis en dirección Y, se observa que los dispositivos de disipación no entraron en fluencia al mismo tiempo apareciendo mas disimuladamente los quiebres. La misma situación sucede al entrar en fluencia los pórticos, donde los cambios de rigidez se van dando a medida que las diferentes secciones de vigas entran en fluencia.

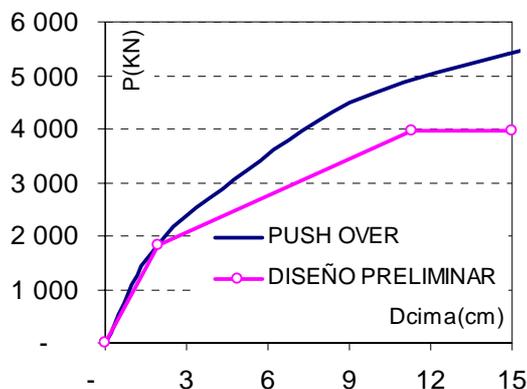


Figura 12: Push – Over dirección Y (corte basal [KN] vs desplazamiento en la cima [cm])

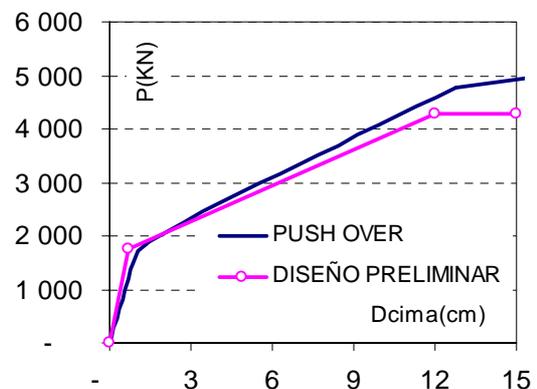


Figura 13: Push – Over dirección X (corte basal [KN] vs desplazamiento en la cima [cm])

Solo para observar el comportamiento del sistema en cargas cíclicas se analizó el comportamiento del sistema en un análisis estático con un ciclo de carga creciente para la dirección X, figura 14, donde queda evidenciado la influencia de los dispositivos de fluencia de acero.

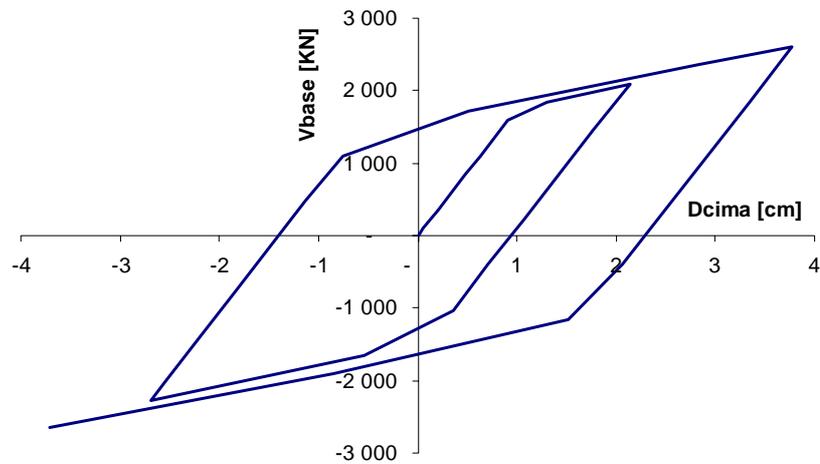


Figura 14: Análisis estático con un ciclo de carga creciente para la dirección X

4.2 Análisis Dinámico

Con el fin de investigar la respuesta del comportamiento estructural sometido a una fuerte excitación sísmica, se utilizó un acelerograma artificial generado para la ciudad de Mendoza, a partir de los datos de la microzonificación sísmica correspondiente, (INPRES, 1995), con periodo de recurrencia de 475 años (10% de excedencia en 50 años) el cual se muestra en la figura 15

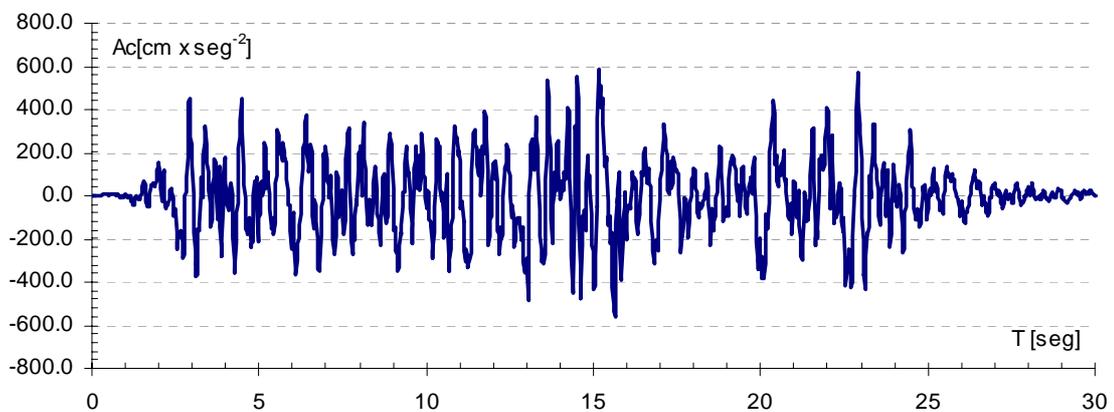


Figura 15: Acelerograma utilizado

En la figura 16 se grafica la respuesta en la cima para la dirección Y obteniendo un desplazamiento máximo de 7.75cm, el desplazamiento máximo en el pórtico extremo es de 8.10 cm, a causa de la rotación generada en la planta. El desplazamiento máximo previsto con el diseño preliminar es de 11.28.

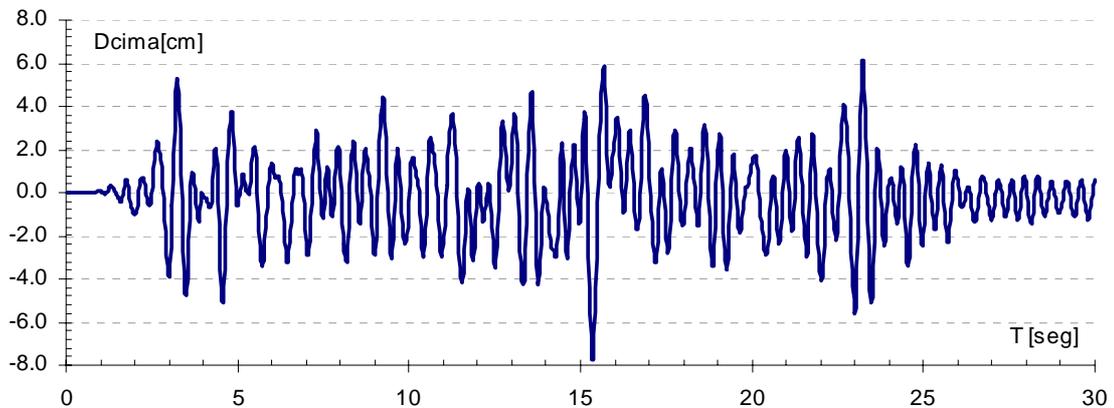


Figura 16: Análisis dinámico no lineal en dirección Y

En la figura 16 se grafica la respuesta en la cima para la dirección X obteniendo un desplazamiento máximo de 2.10cm, el desplazamiento máximo en el tabique acoplado externo es de 3.95 cm, a causa de la rotación generada en la planta. El desplazamiento máximo previsto con el diseño preliminar es de 4.82.

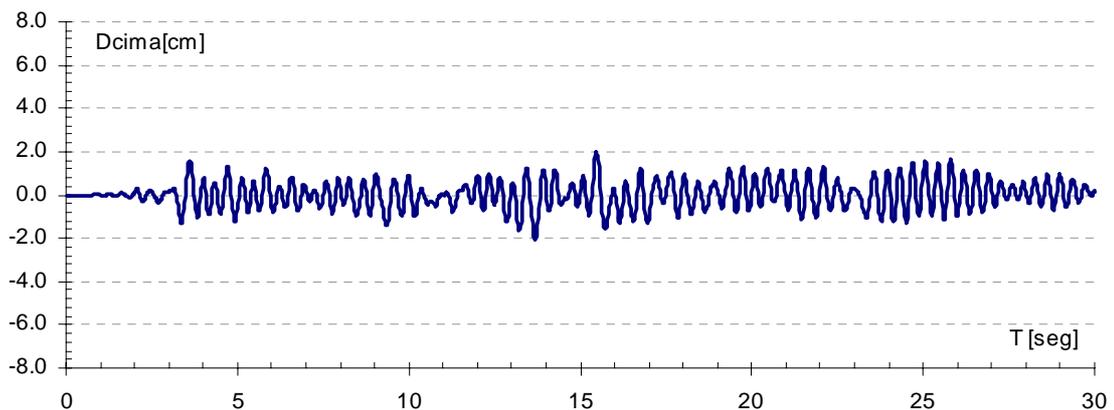


Figura 17: Análisis dinámico no lineal en dirección X

Se debe tener en cuenta que los desplazamientos predichos son obtenidos a través de una metodología de diseño preliminar desarrollada en el trabajo de referencia (Rubinstein et al. 2009), y que la verificación no lineal en este caso se realizó solo sobre un acelerograma de diseño.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un elemento que se suma a un software de análisis estático y dinámico no lineal que aplica el método de los elementos finitos con formulación en desplazamientos. Dicho elemento incorpora tres resortes no lineales, uno en cada grado de libertad.

Este elemento modela el comportamiento no lineal que caracteriza, en este caso a un elemento disipador de energía por fluencia de acero, dejando abierta la posibilidad de implementar otros modelos de comportamiento no lineales.

La implementación, de este elemento permite la verificación no lineal de estructuras planas, y a través del análisis con la simplificación de retener solo tres grados de libertad por piso, dos traslaciones horizontales y una rotación alrededor del eje vertical, resolver los sistemas espaciales de sistemas estructurales sismorresistentes.

Realizando verificaciones sobre estructuras sencillas se verificó que el comportamiento carga desplazamiento de dichas estructura cumple con la ecuación constitutiva de la figura 1 que se intentó modelizar. Dicha situación se ve reflejada en la figura 14 donde se le aplico a la estructura un ciclo de carga creciente en la dirección X donde actúan los cuatros tabiques acoplados.

La importancia de la implementación de este elemento radica en permitir la modelización de estructuras con dispositivos que concentran deformaciones con distintos modelos constitutivos fuerzas – desplazamientos dentro de un software de elaboración propia (DINLI, Möller 2001) el cual ya permitía la modelización de comportamientos no lineales de barras aplicando el método de los elementos finitos con formulación en desplazamientos.

Se estima conveniente para trabajos futuros comparar los resultados de este modelo con mediciones experimentales que se dispongan en la bibliografía.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Nacional de Rosario y al Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras, por el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ascheri, J. P., Rubinstein M. y Möller, O., Diseño de Dispositivos de Fricción en Pórticos Sismorresistentes de Varios Pisos Aplicando Resultados de Control Activo Predictivo. *Memorias del VII Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la construcción. Salta. Argentina. 2007.*
- Ascheri, J. P., Rubinstein M. y Möller, O., Diseño Matemático de Disipadores de Energía Sísmica Utilizando Estrategia de Control Activo Predictivo. *Memorias del XV Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Santa Fe. Argentina. 2006.*
- Bozzo, L. M. y Barbat, A. H., Diseño sismorresistente de edificios. Técnicas convencionales y avanzadas, *Editorial Reverté S.A., 2000.*
- INPRES. *Microzonificación Sísmica del Gran Mendoza.* Publicación Técnica N° 19. 1995.
- Möller, O., Rubinstein, M., Coceres, H., Combinación de planos sismorresistentes para análisis dinámico no lineal de estructuras espaciales. *Memorias del XII Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Argentina. 2003.*
- Möller, O. Metodología para evaluación de la probabilidad de falla de estructuras sismorresistentes y calibración de códigos. *Tesis de Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional de Rosario, 249 páginas, 2001.*
- Kasai, K. and Kibayashi, M., JSSI Manual for building passive control technology Part-1 Manual contents and Design/Analysis Methods. *Proceedings 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver. Canada. Paper No 2989. 2004.*
- Rubinstein, M. Aira, R., Möller, O., Diseño preliminar de sistemas estructurales sismorresistentes con disipadores de energía por fluencia de metal. *VIII Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la construcción. Mendoza. Argentina. 2009.*
- Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. and Su, Y.F. (1993), Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for seismic-Resistant Construction, *Earthquake Spectra*, 9(3), 505-528
- Soong, T. T. and Dargush, G. F., *Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering.* John Wiley & Sons Ltd. 1997.